

## 飛散灰로부터 回收한 未燃炭素粉의 物理·化學的 特性

安良珪·梁政一\*

建陽大學校 化學科, \*韓國資源研究所

### Physicochemical Properties of Unburned Carbon from Fly Ash

Yang Kyu Ahn and Jung Il Yang\*

Department Chemistry, Konyang University  
\*Korea Institute of Geology, Mining & Materials

#### 요 약

비산회에 함유된 잔류 혹은 미연소된 탄소분을 회수하고, 이 미연탄소분의 물리·화학적 특성을 조사하였다. 미연탄소분이 농축된 시료는 비산회를 정제하기 위해 사용되는 부선법을 사용하여 얻었다. 얻은 미연탄소분 시료가 함유하는 탄소분의 총량과 공업 분석을 하였다. 회수된 탄소분에 잔류된 회의 양과 화학조성도 분석하였다. 이 외에 탄소분의 크기 분포, 표면적, 기공의 크기, 결정 구조 및 밀도 등과 같은 물성을 측정하였다.

#### ABSTRACT

The physicochemical properties of residual or unburned carbon obtained from fly ash were investigated. The carbon-enriched samples were extracted from fly ash by flotation method. The carbon content and chemical composition of the recovered carbon sample were analyzed. The ash in the carbon sample was also examined. The unburned carbon characterization included measurement of size distribution, surface area, crystal structure and density.

#### 1. 서 론

석탄을 연료로 하는 보일러로부터 배출되는 비산회는 주성분이 포졸란이라는 것과 높은 알루미늄을 함유하는 것으로 인해 그 활용 가치가 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 그러나 비산회를 정제하지 않고 산업원료로 직접 활용하기에는, 보일러에서의 불완전 연소과정으로 비교적 높은 미연소 탄소분이 함유되어 있다. 많게는 무게비로 비산회의 10% 정도가 함유되어 있으나, 3~8%의 미연탄소분을 함유하는 것이 일반적이다. 이와 같은 미연탄소분은 석탄회를 재활용하고자 하는 측면에서는 비산회의 가치를 저하시키는 요인으로 작용한다. 연소 후 비산회에 잔류하는 미연탄소분의 함량이나 특성은 보일러의 효율성이나 경제성을 개선하는데 있어서 매우 중요하다. 최근에 보일러의 효율을 높이기 위한 주된 관점에서, 석탄의 연소특성과 잔류 탄소분의 발생량 및 특성에 대한 연구가 진행되어 왔다.<sup>1-6)</sup> 이와는 별도로

로 발생된 석탄회의 재활용 가치를 높이기 위하여 미연탄소분의 제거나 특성에 대한 연구도 이루어지고 있다.<sup>4,5)</sup>

비산회의 주된 재활용처의 하나인 콘크리트 혼화제의 경우, 작열감량 기준으로 무게비 3% 이하이어야만 그 경제성이 높아진다<sup>6)</sup> 이는 미연탄소분이 콘크리트에 미치는 악영향 때문인데, 이외에도 제올라이트의 합성 원료나 플라스틱의 충전제 등과 같은 산업 원료로 사용할 경우에도 미연탄소분 함량이 낮은 비산회가 요구된다.<sup>4,5)</sup> 이와 같은 연유로 해서 발전소 등에서 발생하는 석탄회를 직접 쓰기보다는 정제를 통해서 부가가치를 높이는 정제공장이 설립 운영되고 있다. 정제된 석탄회의 생산량이 많아질수록 정제의 부산물인 미연탄소분의 량도 증가되고 있으나 현재는 최종 폐기물로서 전량 매립되고 있다.

국내에서 석탄을 연료로 하는 화력발전소 가운데 하나인 보령화력발전소에서 폐기되는 비산회는 한국플라이애쉬공업과 보령플라이애쉬에서 정제하여 시판하고 있다. 이들 두

회사의 주된 정제 방식은 싸이클론을 이용한 건식법이고, 한국플라이애쉬공업의 경우 한국자원연구소와 공동으로 습식 부선법<sup>7)</sup>에 의한 고품위 비산회를 회수하기 위한 연구가 상당부분 진행된 상태이다. 이들 정제과정에서 배출되는 부산물인 미연탄소분이 다량 함유된 회는 아직 별도의 용도가 개발되어 있지 않다.

본 연구에서는 이러한 미연탄소분의 재활용처를 발굴하기 위한 사전 기초연구로, 미연탄소만이 갖는 특유의 물리적, 화학적 성질을 분석하였다. 미연탄소분 자체가 갖고 있는 특성에 대한 연구까지는 아직 보고된 바가 없다. 연소과정을 거친 후에도 잔류되는 탄소분은 원료인 석탄에서는 볼 수 없는 다공성, 높은 비표면적, 열적 안정성 등 많은 특성을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>4,8-10)</sup> 본 연구에서는 고품위의 비산회를 얻기 위한 습식 부선과정에서 발생하는 미연탄소분을 제차 정제하여 얻은 것<sup>10)</sup>을 물질분석 대상 시료로 사용하였다. 회수된 미연탄소분이 갖는 형태학적 특성은 이전의 연구 보고<sup>8,10)</sup>에서 발표되었고, 금번에는 이들 탄소분의 화학성분, 크기분포 및 비표면적 등의 기초적인 물질들을 분석하였다. 이와 함께 활성탄의 일부 물성치도 실험하여 비교하였다. 이와 같은 연구결과들은 지난번의 전자현미경을 이용한 형태 분석 결과와 함께 미연탄소분만이 갖는 특성을 활용한 재활용처 개발에 필요한 기초자료로 활용될 것이다

## 2. 실험

### 2.1. 시료

실험 대상이 된 비산회는 충남 보령에 소재한 보령화력 발전소에서 배출되는 것으로, 미연탄소분은 이 비산회로부터 습식 부선법으로 회수하였다.<sup>7)</sup> 이 과정은 원래 석탄회 원광으로부터 미연탄소분을 제거, 고품위의 정제된 석탄회를 얻기 위한 과정이다. 이 과정에서는 부산물로 부유 물질인 미연탄소분을 얻고, 이를 제차 부선과정을 거쳐 실험용 미연탄소분을 얻었다. 최종적으로 회수된 미연탄소분에는 부선 시약이 남아 있어 물에 잘 분산되지 않는다. 이 잔류 시약을 제거하기 위해서 시료를 아세톤으로 세척한 후 100°C에서 건조하였다. 탄소분의 열처리 특성을 보기 위한 시료는 아세톤으로 세척을 하지 않은 것을 100°C에서 건조한 후 TG/DTA/DTG(Thermogravimetry/ Differential Thermal Analysis/Derivative Thermogravimetry)의 분석과, 열처리 온도에 따른 중량감소를 알아보기 위한 실험에 그대로 사용하였다. 미연탄소분이 갖는 물성과 비교하기 위해 사용된 활성탄은 국내 S 업체에서 생산한 것으로 코코넛 껍질로

부터 제조한 것이다.

### 2.2. 특성분석

다공성인 미연탄소분의 작은 구멍 깊은 곳에 위치한 회분은 부선과정에서도 잘 제거되지 않고 잔류하게 된다.<sup>10)</sup> 이 잔류 회분의 화학성분을 분석하기 위한 탄소분의 처리는 ASTM에 나와 있는 석탄이나 코크스의 회분 분석 시와 같은 과정<sup>11)</sup>에 따랐다. 시료를 우선 500°C에서 1시간 열처리한 후, 다시 750°C에서 2시간 열처리하여 얻은 회분을 분석용 시료로 사용하였다. 화학분석은 플라즈마분광분석법(ICP-AES)을 이용하였다. 탄소의 공업분석은 LECO사의 TGA601모형을 사용하였다. 휘발분은 산소가 차단된 상태에서 925°C에서 7분간 열처리하여 얻었다. 회분은 대기 분위기의 825°C에서 2시간 열처리하여 얻었다. 미연탄소분이 갖는 내열성의 특성을 보기 위하여 TG/DTA/DTG를 분석을 하였다. 이를 바탕으로 탄소분의 감량 변화가 나타나는 온도 영역을 중심으로 탄소분의 비표면적을 측정하였다. 비표면적 측정에 쓰인 시료는 아세톤으로 세척하여 얻은 시료를 100°C에서 건조한 후 300, 400, 500, 550°C에서 각각 2시간씩 열처리한 후 얻은 시료를 비표면적 측정 시료로 사용하였다. 미연탄소분과 활성탄의 표면적과 기공의 평균 크기는 77K에서 질소를 흡착, BET(Brunauer, Emmett and Teller)등은법을 사용하여 구하였다. 충전밀도와 pH는 KS에 제시된 활성탄의 시험 방법<sup>12)</sup>에 따라 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 화학분석

비산회를 정제하기 위한 습식 부선의 부산물인 탄소분에는 다른 논문<sup>13)</sup>에서 보고된 바와 같이 회가 일부 잔류하게 된다. 본 연구의 실험에서 사용된 시료는 LECO사의 TGA 601 모델을 사용, 825°C에서 제차 연소시킨 결과 회분의 함량은 20-25%로 나왔다. 이는 일반적인 유연탄의 연소시 발생하는 회분의 량보다는 2배 이상 많은 량이다. 본 연구에서 비교 물질로 사용된 코코넛 껍질로부터 만든 활성탄은 같은 실험과정에서 6%로 나온 것과도 비교해볼 때에 3배 이상이 된다. 회수된 탄소분을 공업분석한 결과인 Table 1을 보면 고정탄소(fixed carbon)는 약 75%로 활성탄의 그것에 10% 정도가 적다. 휘발분의 경우에는 4.44%로 8.2%를 갖는 활성탄에 비해 약 1/2 정도로 낮은 편에 해당된다. 휘발분의 차이는 고정탄소의 차이에 비해 비교적 많이 차이가 나는 것으로 나타났다. 회분의 함량이 있어서 미연탄소분 시료가 활성탄의 그것보다 15% 이상 많은데, 이와 같은 차이는 고정탄소

**Table 1.** Proximate analysis of unburned carbon obtained from Boryung fly ash

	Fixed Carbon	Ash <sup>a)</sup>	Volatile Materials <sup>b)</sup>	Moisture <sup>c)</sup>
Unburned carbon	74.7	20.9	4.44	0.93
Activated carbon <sup>d)</sup>	85.5	6.35	8.20	5.80

<sup>a)</sup> fired at 825°C, for 2 hr,

<sup>b)</sup> 7 min at 925°C in inert environment,

<sup>c)</sup> 1 hr at 107°C,

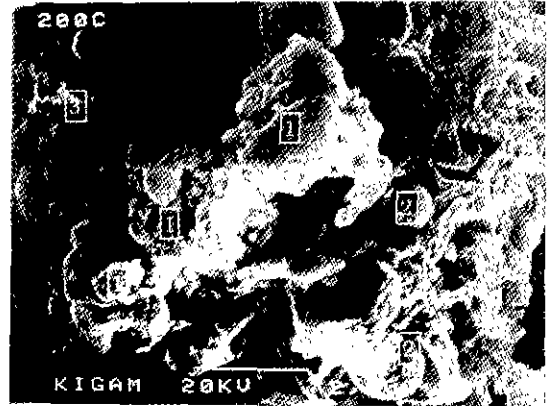
<sup>d)</sup> from coconut shell

와 휘발분의 함량 차이에 해당된다. 대기 중에서의 흡수율은 활성탄이 약 6%인 반면, 미연탄소분은 약 1%로 활성탄의 그것에 비해 1/6 정도로 고정탄소의 함량에 비교해 볼 때 매우 낮은 흡수능력을 갖는 것으로 나타났다.

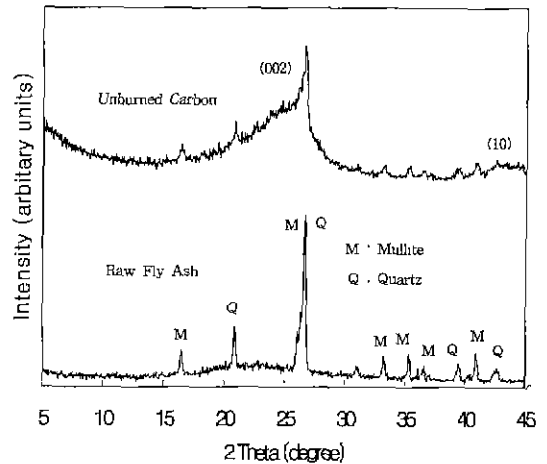
회수된 미연탄소분 시료가 가지고 있는 회분의 주요 성분을 플라즈마 분광분석법으로 분석한 결과를 Table 2에 기재하였다. 전체적인 화학조성비는 비산화 원광의 그것과 매우 유사한 것으로 분석되었다. 미연탄소분에 함유된 회분이 비산화 원광보다 알루미늄의 함량은 약 4% 정도 높은 반면, 실리카, 산화철, 및 산화칼슘 등의 성분은 약간씩 낮은 것으로 나타났다. 이는 지난번의 논문<sup>13)</sup>에서 지적된 바와 같이, 탄소 입자의 기공 속 혹은 팽창된 판상구조의 탄소 판과 판 사이에서 종종 관찰되는 고품도계 광물로부터 기인한다고 볼 수 있다. Fig. 1에 나타난 판 형태의 회분은 성분이 고품도 광물과 유사한 알루미늄과 실리카만을 주성분으로 한다. 알루미늄의 함량이 높고, 알칼리 금속이나 철분이 적은 경우 회분은 완전히 용융되지 않아 구슬 형태를 띠지 않고, 길다란 막대기나 넓은 판상의 형태를 갖게 된다. 이와 같은 형태는 미연탄소 입자의 탄소껍질이 회분에 파고 들어가 있거나 회분이 탄소판 사이에 단단히 끼어 들어가는 구조가 된다. 따라서 이와 같은 회분은 탄소로부터 부선회 과정에서 쉽게 빠져 나오지 못하게 되어 결국 회수된 미연탄소분의 회분 함량에서 알루미늄의 함량을 상대적으로 높게 된다. 코코넛 껍질로 만든 활성탄이 갖고있는 회분의 경우는 실리카의 함유량은 비슷하나 알루미늄의 함량이 낮고, 반면에 철분, 칼슘, 포타슘 및 소듐의 함량이 상대적으로 매우 높은 것으로 나타났다.

**Table 2.** Chemical composition of ash samples

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Raw fly ash	64.5	25.1	3.69	2.87	1.13	-
Ash from unburned carbon	63.3	29.1	2.07	2.40	0.73	0.21
Ash from activated carbon	60.6	17.4	12.6	3.60	17.8	5.31



**Fig. 1.** SEM micrograph of an unburned carbon particle with ash particles.



**Fig. 2.** X-ray diffraction patterns of unburned carbon and raw fly ash samples.

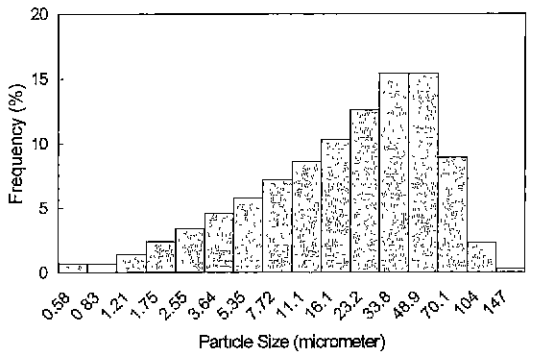
**3.2. X-선 회절분석**

미연탄소분과 비산화 원광의 X-선분석 결과는 Fig. 2와 같다. 회분이 제거된 미연탄소분의 경우 전형적인 탄소의 (002)의 피가 확산된 형태로, 2θ값이 25° 근처에서 강하게 나타나 있다. 그리고 아주 약하게 이차원의(10)피가 43° 근처에서 나타나고 있다. 회분이 제거되기 전인 비산

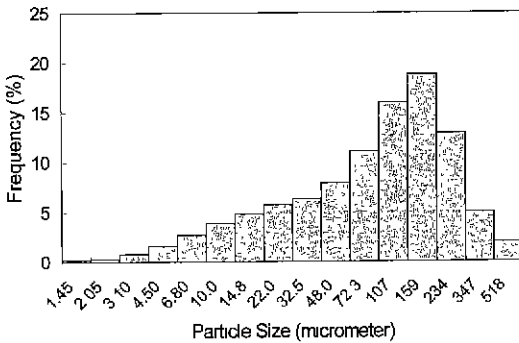
**Table 3.** EDX analysis of the unburned carbon particle including ash particles in Fig. 1 (wt%)

Number	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	C
1	39.1	60.9	-	-	-	-
2	61.6	30.3	4.87	2.15	1.54	-
3	-	-	-	-	-	100

회 원광의 경우에는 탄소분의 함량이 5% 정도로 낮을 뿐 아니라, 회분을 이루는 주된 광물인 몰라이트(mullite)와 석영의 신호에 의해 탄소의 결정 확인이 쉽지 않다. 미연 탄소분의 XRD 스펙트럼에서는 비산화 원광에서 확인된 광물들인 몰라이트와 석영의 신호를 비교적 쉽게 찾을 수 있다. 따라서 미연탄소분에 함유된 회분의 경우도 주된 결정의 성분은 몰라이트와 석영임을 알 수 있다. 이는 회분의 화학분석의 결과에서 고령토계 광물의 알루미늄과 실리카의 함량비와 비교해 볼 때, 알루미늄의 함량보다 실리카의 함량이 높게 나타나는 이유를 유추할 수 있는 좋은 근거이다.



(a)



(b)

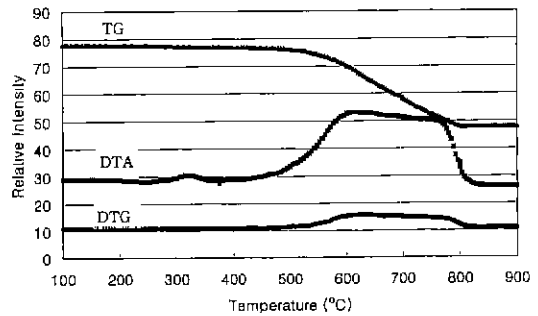
**Fig. 3.** Size distribution of (a) activated carbon particles, (b) unburned carbon particles obtained from Boryung fly ash sample.

**3.3. 입도분포**

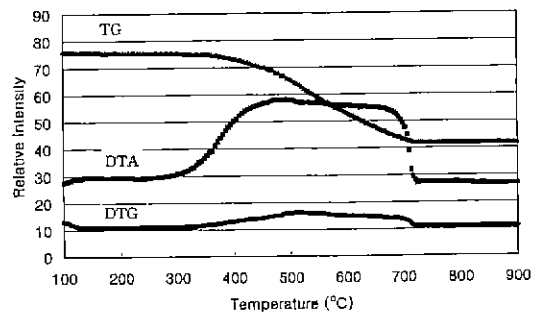
부선으로 회수한 미연탄소의 크기는 1 μm 정도에서부터 600 μm에 이르기까지, Fig. 3(b)에서 보는바와 같이 그 크기의 분포가 넓다. 중간값은 약 95 μm이나, 가장 빈도가 높은 크기는 159 μm 근처인 것으로 나타났다. 측정된 시료의 80%는 12~240 μm의 영역에 속하였다. 이는 포졸란형의 석탄회 구슬의 크기가 일반적으로 1~8 μm<sup>16)</sup>를 갖는 것에 비하면, 석탄회를 포획하기에 충분히 큰 것이다. 이와 비교하기 위해 사용된 분말형 활성탄의 경우는 1 μm 이하에서부터 150 μm에 이르기까지 존재하며, 미연탄소분에 비해 범위가 좁다. 중간값을 갖는 크기는 21.5 μm이고, 가장 빈도가 높은 크기값은 40 μm 부근인 것으로 측정되었다.

**3.4. 열적 특성**

미연탄소분의 열에 대한 특성을 활성탄과는 다르게 나타났는데, TG/DTA/DTG의 결과는 Fig. 4와 같다. 활성탄의 경우 감량은 300°C를 넘으면서 본격적으로 시작되나 미연탄소분의 경우에는 450°C 근처에서까지 열에 대해 안정한 것으로 나타나고 있다. 즉, 미연탄소분이 활성탄에 비해서 약 150°C 이상의 높은 온도에서까지 연소되지 않고 안정함



(a)



(b)

**Fig. 4.** Thermal analysis of (a) Unburned Carbon, (b) Activated Carbon.

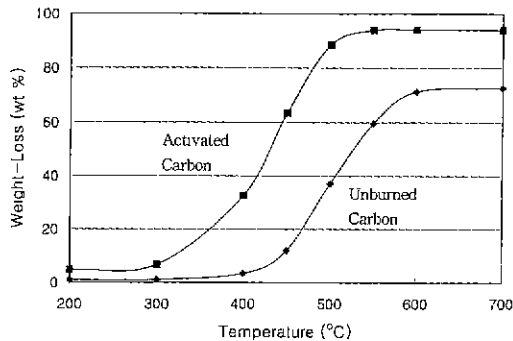


Fig. 5. Weight-loss after heat treatment for unburned carbon and activated carbon samples.

을 보여주고 있다. 온도가 증가하면서 탄소분의 감량도 증가하기 시작해. 미연탄소분의 경우 450에서 600°C까지, 활성탄은 300에서 460°C까지 DTA의 곡선의 기울기가 양의 값을 갖고 있다 이 영역은 열처리 온도에 따른 작열감량을 보여주는 Fig. 5에서 탄소분이 급격히 감소하는 영역과도 일치한다. 따라서 이 영역이 탄소분들의 구조 특성에 따라 부분적으로 연소 가능한 온도로 볼 수 있다. 미연탄소분은 600에서 약 780°C, 활성탄은 460에서 680°C의 영역에서 각기 DTA곡선의 기울기가 음의 값을 갖으나 완만한 양상을 보이고 있다. 이것은 미연탄소분 시료의 경우 600°C, 활성탄 시료는 460°C 이상에서는 모든 종류의 탄소분들이 연소 가능함을 보여주는 것이다. 이 온도 영역을 벗어나면 DTA 곡선은 음의 값의 급격한 기울기를 갖게되고, 이것은 각각 810, 720°C에서 끝나게 된다. 즉 탄소분이 완전히 연소된 것으로 볼 수 있다.

미연탄소분 시료를 300에서 700°C 영역에서의 작열감량 추이를 보면 Fig. 5와 같다. TG/DTA 실험에서와는 달리 주어진 온도에서 충분히 탄소분이 연소될 수 있도록 2시간씩 열처리한 것이다. 이 그림에서 탄소분의 연소는 430°C 근처에서 연소가 시작되며 약 600°C에서 거의 완전한 연소가 이루어짐을 알 수 있다. 또한 감량이 이 영역의 온도에서 감소가 일정하게 이루어지는 것으로 보아 탄소분이 발화가 되어 자체적으로 연소되는 현상은 없는 것으로 보인다.

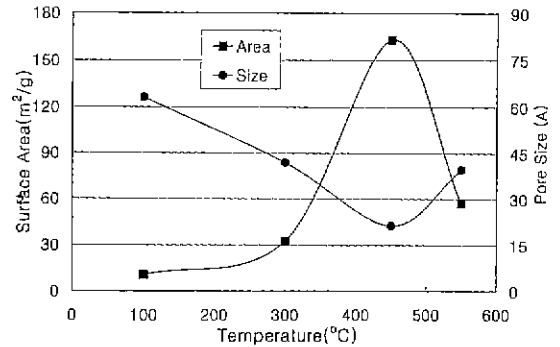


Fig. 6. BET-surface area and pore size of unburned carbon particles after heat treatment.

### 3.5 비표면적 및 기타 물성

회분 함량이 무게비로 21%이고, 입자의 크기가 중간값으로 95 μm를 갖는 미연탄소분 시료를 아세톤으로 세척한 후, 100°C에서 건조한 것을 BET 등온법으로 표면적을 측정할 결과 11 m²/g로 측정되었다. 이때 미세공의 평균 크기는 63 Å로 나타났다. 활성탄은 10배 이상 높은 1,182 m²/g를 갖는 것으로 측정되었고, 미세공의 평균 크기는 18 Å로 측정되었다

탄소분의 열처리 온도에 따른 표면적의 변화를 보기 위해, 3.4절에서 논의되었던 열처리된 탄소분이 갖는 표면적값을 BET 등온법으로 구하였다. 그 결과 Fig. 6와 같은 열처리 온도에 따른 변화를 보여 주었다. 탄소분에 대한 열처리 특성을 나타낸 Fig. 4와 5에서 탄소분의 함량이 본격적으로 줄어들기 시작하는 온도 영역인 400에서 450°C의 구간에서 표면적의 변화가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 표면적은 450°C 근처에서 열처리한 것이 최고의 값 163 m²/g를 보이고 있고, 이 온도를 넘어서면서 표면적은 급격히 감소하는 양상을 보였다. 평균 미세공의 크기는 450°C에서 열처리한 것이 약 21 Å로 가장 작은 값을 보이고 있으며, 이 온도 전후해서 미세공의 평균 크기는 증가하는 것으로 나타나 표면적의 변화 양상과는 반대를 보여주고 있다.

미연탄소분이 갖는 0.1 μm 이상에서 수십 μm의 다양한 크기의 기공은 SEM 관찰 결과에서 밝혀졌다.<sup>8,10)</sup> 이와 같은

Table 4. Some physical properties of unburned carbon and activated carbon

	BET-Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Avi. pore size (Å)	Density (packed) (g/cc)	Volume of open cell (cc/g)	Diameter of particle (med. μm)
Unburned carbon <sup>a)</sup>	163	21	0.43	1.88	95
Activated carbon <sup>b)</sup>	1,182	18	0.52	1.45	22

<sup>a)</sup> from Boryung fly ash, <sup>b)</sup> from coconut shell

많은 기공들의 존재는 탄소분의 밀도에도 큰 영향을 줄 수 있는데, 충전밀도는 0.43 g/cc로 측정되었고, 이 값은 활성탄의 0.52 g/cc에 비해 낮은 값이다. 탄소분의 BET 표면적이 활성탄의 그것에 비해 1/8 정도로 낮은 것으로 보아, 미세공의 수는 상대적으로 적지만,  $\mu\text{m}$  단위의 수많은 기공들은 상대적으로 많아 낮은 밀도를 갖는 것으로 보인다. 이와 같은 개기공의 부피를 측정하기 위해, 충전시킨 미연탄소분에 물을 가해 구한 부피는 1.88 cc/g이고, 같은 방법으로 구한 활성탄은 1.45 cc/g이었다. 절대적인 기공의 부피는 미연탄소분이 활성탄에 비해 더 큰 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

비산회로부터 습식 부선법으로 회수한 미연탄소분 시료는 탄소 입자의 열린 기공사이에 회분을 포함하고 있어, 무게비로 평균 20~25%의 회분을 갖는 것으로 분석되었다. 21%의 회분을 갖는 탄소분 시료의 경우 75%의 고정탄소를 4.44%의 휘발분을 갖는 것으로 나타났다. 회분의 주된 화학 성분은 원광과 같은 알루미늄과 실리카이나, 원광에 비해서 알루미늄의 함량이 약 4% 정도 높게 나왔다. 내화물질인 알루미늄의 함량이 상대적으로 높고, 일종의 용제 역할을 하는 철분 및 알칼리금속 성분이 낮은 회분의 겉보기 형태는 주로 판상이나 막대기 모양을 나타내었다. 이들은 탄소 판 사이로 파고 들어가 부선과정에서 쉽게 분리되지 않았기 때문에 미연탄소분의 최종 시료에서 쉽게 관찰되었다. 회분의 주된 광종은 석영과 물라이트로 밝혀졌다. 미연탄소분의 결정구조는 탄소의 전형적인 XRD 띠인(002)과(10)이 확장된 모양을 보여 주었다.

부선 회수된 탄소 입자의 평균 크기는 중간값으로 약 95  $\mu\text{m}$ 의 크기를, 가장 빈도 높은 크기 영역은 150~160  $\mu\text{m}$ 에 전체적으로 1에서 600  $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 크기의 분포를 갖고있어서 회분의 함량이 21%인 미연탄소분은 충전밀도가 0.43 g/cc로 활성탄의 0.52 g/cc 보다 낮게 측정되었다. 그러나 BET 비표면적은 시료의 열처리 온도에 따라 활성탄의 1/10~1/7 정도에 해당하는 10~163  $\text{m}^2/\text{g}$ 을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 값은 SEM 관찰 결과<sup>8,10)</sup>에서 보듯이 활성탄에 비해서 미연탄소분이 큰 기공들을 많이 갖고 있고, 상대적으로 내부가 비어 있는 상태이기 때문이다. SEM 관찰에서는 보이지 않았던 미세공의 평균 크기와 비표적 값은 열처리 온도에 따라 다른 값을 보여 주었다. 미세공의 경우 450°C 열처리한 것이 21 Å로 가장 작은 값을, 이때 비표면적은 163  $\text{m}^2/\text{g}$ 으로 최대값을

나타내었다. 열처리 온도 450°C를 중심으로 그 이하와 이상에선 표면적은 작아지면서 미세공의 평균 크기는 커지는 양상을 보여 주었다.

#### 참고문헌

1. M. Shibaoka : "Microscopic Investigation of Unburnt Char in Fly Ash", Fuel 64, 263-269 (1985).
2. P.M. Walsh, J. Xie, R.E. Douglas, J.J. Battista and E.A. Zawadzki : "Unburned Carbon Loss from Pulverized Coal Combustors", Fuel 73(7), 1074-1081 (1994).
3. R.H. Hurt and J.R. Gibbins : "Residual Carbon from Pulverized Coal Fired Boilers : 1. Size Distribution and Combustion Reactivity", Fuel 74(4), 471-480 (1995).
4. R.H. Hurt, K.A. Davis, N.Y.C. Yang, T.J. Headley and G. D. Mitcheli : "Residual Carbon from Pulverized-Coal-Fired Boilers: 2. Morphology and Physicochemical Properties", Fuel 74(9), 1297-1306 (1995).
5. H. Ban, T.X. Li, J.C. Hower, J.L. Schaefer and J.M. Stencel : "Dry Triboelectric Benefication of Fly Ash". Fuel 76(8), 801-805 (1997).
6. E. Freeman, Y.M. Gao, R. Hurt and E. Suuberg : "Interaction of Carbon-Containing Fly Ash with Commercial Air-Entering Admixtures for Concrete", Fuel 76(8), 761-765 (1997).
7. 양정일, 최우진, 조건준, 최연호, 전호석, 김삼배, 안양규, 황선국 : "석탄 및 석탄폐석 활용연구", KR-93-7D, 한국자원연구소 (1994).
8. 길대섭, 양정일, 안양규 : "비산회로부터 회수한 탄소분의 특성 I. 전자현미경을 이용한 형태분석" 한국자원리싸이클링학회 제 10회 학술발표대회, 논문개요집 29-30 (1997).
9. 안양규, 양정일, 황선국 : "비산회로부터 회수한 탄소분의 특성 II : 물리화학적 특성" 한국자원리싸이클링학회 제 10회 학술발표대회, 논문개요집 31-32 (1997).
10. 안양규, 길대섭, 양정일 : "비산회에 함유된 미연탄소분의 특성: 전자현미경을 이용한 특성분석", 자원리싸이클링 (in press).
11. ASTM Committee : "Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash by Atomic Absorption", Annual Book of ASTM Standards, Vol 05. 05, D3682-87 (1987)
12. 한국산업표준심의회 : "활성탄 시험 방법" KS M 1802 (1993).